

Toplam Elektron İçeriği (TEİ)

TEİ bir L yolu boyunca elektron yoğunluğunun çizgi integrali olarak tanımlanır:

$$\text{TEİ} = \int_L N_e(l) dl \quad (1)$$

Yukarıdaki denklemde N_e , L yolu boyunca elektron yoğunluğunu göstermektedir.

TEİ, iyonosferdeki 1 m^2 kesitli silindir boyunca toplam serbest elektron miktarı olup TECU birimi ile ifade edilir. $1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ el/m}^2$ dir. TEİ, *STEC* ve *VTEC* olmak üzere iki şekilde ifade edilebilir. *STEC*, alıcı ile uydu arasındaki hat üzerinde hesaplanan toplam serbest elektron miktarı, *VTEC* ise alıcıya göre yerel zenit doğrultusunda hesaplanan toplam serbest elektron miktarıdır. TEİ konum, zaman frekans gibi etkenlere bağlıdır. YKS işaretleri kullanılarak TEİ kestirimi iyonosferin yapısını anlamak için doğrudan kullanılan bir yöntemdir.

Yerküresel Konumlama Sistemi (YKS) Gözlem Parametreleri ile Toplam Elektron İçeriğinin Hesaplanması

- İyonosferin yapısını anlamak için YKS (Global Positioning System-GPS) işaretlerini kullanmak oldukça yaygın bir yöntemdir. İyonizasyon sonucu ortaya çıkan serbest elektronlar, yaklaşık 50 MHz üzerindeki işaretler için yüksek iletkenliğe sahip yön bağımsız bir tabaka oluşturur ve işaretinin frekansa bağlı kırılmasına neden olurlar. Bu kırılma etkisiyle farklı frekanstaki işaretler alıcıya farklı gecikmeler ile ulaşırlar.
- Kırılma etkisiyle işaretler, grup hızlarının yavaşlamasından dolayı YKS alıcılarına gecikme ile ulaşır. Bu durum YKS sistemindeki konumlama hatasının temel kaynaklarından biridir.
- YKS uydularından yeryüzüne iki farklı frekansta işaret gönderilir. İki farklı frekansta işaret gönderilmesinin nedeni iyonosferden kaynaklanan gecikmenin kalibrasyonudur. YKS sinyallerinin taşıyıcı frekansları $f_1 = 1227.60 \text{ MHz}$ ve $f_2 = 1575.42 \text{ MHz}$ 'dir.
- Bu frekanslarındaki işaretlerin gecikmeleri arasındaki fark gözlenerek iyonosferin yapısı incelenebilir. YKS işaretlerindeki iyonosfere bağlı gecikme TEİ'nin bir fonksiyonudur.
- YKS gözlem parametrelerinden *STEC* ve *VTEC* hesaplanırken
 - 1) İyonosferin yanca (azimuth) doğrultusunda homojen olduğu,
 - 2) İyonosferin sonsuz incelikte bir yapı olduğu varsayımları yapılmaktadır.
- TEİ değeri YKS alıcılarının kaydettiği gözlem parametreleri, sözde menzil, faz ve her ikisi beraber kullanılarak teorik olarak hesaplanabilir.
- Sözde menzil verileri kullanılarak hesaplanan TEİ değeri mutlak TEİ, faz verileri kullanılarak hesaplanan TEİ değeri bağıl TEİ olarak isimlendirilir. TEİ hesaplamada sözde menzil ölçümlerini kullanmak basit bir yöntemdir fakat ölçümler gürültülü olabilmekte ve çok-yol etkisi görülebilmektedir. Faz ölçümlerinde çok-yol etkisi daha azdır fakat faz ölçümlerinde ilk faz belirsizliği ve faz kopmaları görülebilmektedir.

- Her bir YKS alıcısı aynı anda yaklaşık 6-7 uydudan işaret alabilmektedir. Her bir uydu için alıcı ile uydu arasındaki yol boyuncaki TEİ değeri hesaplanır (*STEC*). Daha sonra hesaplanan bu *STEC* değeri kullanılarak, bir izdüşüm fonksiyonu ile alıcıya göre yerel zenit doğrultusundaki TEİ (*VTEC*) değeri hesaplanır. Herhangi bir anda bir alıcı-uydu çiftinden hesaplanan *VTEC* değeri birbirinden farklıdır. Uydulardan hesaplanan *VTEC* değerlerini kullanarak TEİ kestirimi yapabilmek için literatürde kullanılan çeşitli yöntemler bulunmaktadır.
- YKS gözlem parametresi olan sözde menzil ifadesinin atmosferden geçiş modeli Eş. 2 ve 3'deki gibi yazılabilir:

$$P_{1,u}^m = p_u^m + c(\Delta t_u - \Delta t^m) + d_{trop,u}^m + d_{ion1,u}^m + c(\varepsilon_1^m + \varepsilon_{1,u}) \quad (2)$$

$$P_{2,u}^m = p_u^m + c(\Delta t_u - \Delta t^m) + d_{trop,u}^m + d_{ion2,u}^m + c(\varepsilon_2^m + \varepsilon_{2,u}) \quad (3)$$

Yukarıdaki eşitliklerde m uydu numarası, u alıcı numarası, $d_{ion1,u}^m$ ve $d_{ion2,u}^m$ sırasıyla f_1 ve f_2 frekanslarındaki iyonosferden kaynaklanan grup gecikmesi, $d_{trop,u}^m$ troposferden kaynaklanan grup gecikmesi, Δt^m ve Δt_u uydu ve alıcıların saat hataları, $P_{1,u}^m$ ve $P_{2,u}^m$ f_1 ve f_2 frekanslarına göre sözde menzil, p_u^m uydu ile alıcı arasındaki mesafe, ε_1^m ve ε_2^m , f_1 ve f_2 frekanslarına göre uydu yanlılığı, $\varepsilon_{1,u}$ ve $\varepsilon_{2,u}$, f_1 ve f_2 frekanslarına göre alıcı yanlılığı, α ölçümlerden gelen artık hatalardır. Yukarıda verilen sözde menzil modeline benzer bir model faz verileri için de kurulabilir:

$$\lambda_1 \Phi_{1,u}^m = p_u^m + c(\Delta t_u - \Delta t^m) + \lambda_1 \Phi_{ion1,u}^m + \lambda_1 \Phi_{trop,u}^m - c(\varepsilon_1^m + \varepsilon_{1,u}) + \lambda_1 N_1^m \quad (4)$$

$$\lambda_2 \Phi_{2,u}^m = p_u^m + c(\Delta t_u - \Delta t^m) + \lambda_2 \Phi_{ion2,u}^m + \lambda_2 \Phi_{trop,u}^m - c(\varepsilon_2^m + \varepsilon_{2,u}) + \lambda_2 N_2^m \quad (5)$$

Yukarıda m uydu numarası, u alıcı numarası, $\Phi_{ion1,u}^m$ ve $\Phi_{ion2,u}^m$ sırasıyla f_1 ve f_2 frekanslarına göre iyonosferden kaynaklanan faz gecikmesi, $\Phi_{1,u}^m$ ve $\Phi_{2,u}^m$, f_1 ve f_2 frekanslarına göre alıcının kaydettiği faz değeri, N_1^m ve N_2^m , f_1 ve f_2 frekanslarına göre ilk faz belirsizliği, $\Phi_{trop,u}^m$ troposferden kaynaklanan faz gecikmesidir.

Eş. 2 ve 3 birbirinden çıkarılarak iki farklı frekansta gönderilen işaretin sözde menzil değerleri arasındaki fark Eş. 6'daki gibi bulunabilir. Bu değer geometriden bağımsız doğrusal kombinasyon (GBDK) modeli olarak adlandırılır.

$$P_{4,u}^m = P_{2,u}^m - P_{1,u}^m = d_{ion2,u}^m - d_{ion1,u}^m + c(\varepsilon_2^m - \varepsilon_1^m) + c(\varepsilon_{2,u} - \varepsilon_{1,u}) \quad (6)$$

Faz için GBDK, Eş. 4 ve 5 birbirinden çıkarılırsa, taşıyıcı işaretlerin yol farkı faz değerleri cinsinden Eş. 7'deki gibi elde edilir.

$$L_{4,u}^m = \lambda_1 \Phi_{1,u}^m - \lambda_2 \Phi_{2,u}^m = \lambda_1 \Phi_{ion1,u}^m - \lambda_2 \Phi_{ion2,u}^m + c(\varepsilon_2^m - \varepsilon_1^m) + c(\varepsilon_{2,u} - \varepsilon_{1,u}) + \Delta N^m \quad (7)$$

$$\Delta N^m = \lambda_1 N_1^m - \lambda_2 N_2^m \quad (8)$$

Eş. 2 ve 3'deki p_u^m , $d_{trop,u}^m$, Δt_u ve Δt^m terimleri frekanstan bağımsız; $d_{ion1,u}^m$, $d_{ion2,u}^m$, ε_1^m , ε_2^m , $\varepsilon_{1,u}$ ve $\varepsilon_{2,u}$ terimleri frekansa bağımlıdır. Eş. 4 ve 5'deki p_u^m , $\Phi_{trop,u}^m$, Δt_u ve Δt^m terimleri frekanstan bağımsız; $\Phi_{ion1,u}^m$, $\Phi_{ion2,u}^m$, ε_1^m , ε_2^m , $\varepsilon_{1,u}$ ve $\varepsilon_{2,u}$ terimleri frekansa bağımlıdır. Eş. 6 ve 7'de frekansa bağlı olmayan terimler iki frekans için de aynı değeri verdiği için elenmiştir. P_4 ve L_4 doğrusal kombinasyonlarına geometriden bağımsız doğrusal kombinasyonlar (GBDK) denilmesinin nedeni Eş. 6 ve 7'da gerçek menzil değeri p_u^m 'nin olmamasıdır.

- Eş. 6 ve 7'te ayrıca frekansa bağlı olan alıcı ve uydu yanlışlıklarının farkları da görülmektedir. Bu farklar diferansiyel yanlışlıklar olarak bilinmektedir. Diferansiyel yanlışlıklar Eş. 9 ve 10'daki gibi yazılabilir.

$$DCB_m = \varepsilon_1^m - \varepsilon_2^m \quad (9)$$

$$DCB_u = \varepsilon_{1,u} - \varepsilon_{2,u} \quad (10)$$

Eş. 6 ve 7'de görülen yanlışlık ifadeleri diferansiyel yanlışlıklar biçiminde yazılırsa Eş. 11 ve 12 elde edilir.

$$P_{4,u}^m = d_{ion2,u}^m - d_{ion1,u}^m - c(DCB_m + DCB_u) \quad (11)$$

$$L_{4,u}^m = \lambda_1 \Phi_{ion1,u}^m - \lambda_2 \Phi_{ion2,u}^m - c(DCB_m + DCB_u) + \Delta N^m \quad (12)$$

- TEİ değeri sözde menzil kullanılarak, faz kullanılarak, ve ikisinin birleşiminden oluşan karma yöntemler kullanılarak olmak üzere üç farklı şekilde hesaplanabilir. Sözde menzil ile TEİ hesaplanması basit ve uygun bir yöntemdir. Bu yöntemin dezavantajı ise sözde menzil ölçümlerinin gürültülü olması ve çok-yol etkisinin oluşabilmesidir. Faz ölçümleri ise daha az gürültülidir ve çok-yol etkisi daha azdır fakat ilk faz belirsizliği ve faz kopmaları nedeniyle TEİ hesaplaması zor olmaktadır. Diğer bir yöntem ise hem sözde menzil hem de faz ölçümlerinin kullanıldığı yöntemdir. Bu yöntemde ise faz belirsizlikleri giderilebilir ve daha hassas TEİ değerleri hesaplanabilir, fakat faz kopmaları sorunu devam etmektedir.
- m uydusu ve u alıcısı için iyonosferdeki grup ve faz gecikmeleri ile $STEC$ arasında Eş. 13' daki gibi bir bağıntı yazılabilir:

$$d_{ion,u}^m = -\Phi_{ion,u}^m \frac{c}{f} \approx A \frac{STEC_u^m}{f^2} \quad (13)$$

Eş. 11 ve 12'deki $d_{ion,u}^m$ ve $\lambda_1 \Phi_{ion,u}^m$ ifadeleri, Eş. 13'da görülen $STEC$ cinsinden yazılırsa:

$$P_{4,u}^m = A \left(\frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 f_2^2} \right) STEC_u^m - c(DCB_m + DCB_u) \quad (14)$$

$$L_{4,u}^m = A \left(\frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 f_2^2} \right) STEC_u^m - c(DCB_m + DCB_u) + \Delta N^m \quad (15)$$

elde edilir. Eş. 14 ve 15 kullanılarak $STEC$ değeri Eş. 16 ve 17'deki gibi yazılabilir.

$$STEC_u^m = \frac{1}{A} \left(\frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) [P_{4,u}^m + c(DCB_m + DCB_u)] \quad (16)$$

$$STEC_u^m = \frac{1}{A} \left(\frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) [L_{4,u}^m + c(DCB_m + DCB_u) - \Delta N^m] \quad (17)$$

Seçilen bir alıcı istasyon için m . uydudan, n . ölçüm zamanında sözde menzil kullanılarak hesaplanan $STEC$ değeri Eş. 18'te verilmiştir. Toplam uydu sayısı M , toplam ölçüm sayısı N ile gösterilirse, m ve n için ($1 \leq m \leq M$ ve $1 \leq n \leq N$):

$$STEC_u^m(n) = \frac{1}{A} \left(\frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) [P_{4,u}^m(n) + c(DCB_m + DCB_u)] \quad (18)$$

Eş. 13'te DCB_m ve DCB_u 'nin birimleri saniyedir. Eş. 13'deki f_1 , f_2 ve A 'nın sayısal değerleri yerine yazılırsa

$$\frac{1}{A} \left(\frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) = 2,854 \times 10^{25} \quad (19)$$

elde edilir. Dolayısıyla DCB_m ve DCB_u 'deki 1 ns'lik değişim $STEC$ değerinde 2,854 TECU seviyesinde değişime neden olacaktır. Buna göre 1 ns=2,854 TECU kabul edilerek Eş. 18'te DCB ile gösterilen yanlışlıkların birimleri saniye yerine TECU olarak alınır

$$STEC_u^m(n) = \frac{1}{A} \left(\frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) P_{4,u}^m(n) + b^m + b_u \quad (20)$$

bulunur. b^m ve b_u TECU cinsinden alıcı ve uydu diferansiyel yanlışlıklarıdır.

Sözde menzil ölçümleri kullanarak toplam elektron içeriği hesaplamak daha kolay bir yöntemdir. Sözde menzil ölçümlerinin dezavantajı ölçümlerin gürültülü olmasıdır.

$STEC$ değerinden yola çıkarak $VTEC$ değeri bir izdüşüm fonksiyonu ile aşağıdaki gibi hesaplanır. Bu dönüşüm için iyonosferin sonsuz incelikte ince bir tabakadan oluştuğu varsayımı yapılmaktadır.

$$VTEC_u^m(n) = STEC_u^m(n)/M(\epsilon_m(n)) \quad (21)$$

$$M(\epsilon_m(n)) = \left[1 - \left(\frac{R \cos \epsilon_m(n)}{R + h} \right)^2 \right]^{-1/2} \quad (22)$$

Eş. 21 ve Eş. 22'de ϵ yerel yükseklik açısını, n ölçüm anını, R dünyanın yarıçapını ifade etmektedir. R dünyanın ekvatorial yarıçapı olup 6.378,137 m'dir. İyonosfer yüksekliği, en yüksek iyonlaşmanın olduğu yükseklik olup h ile gösterilmektedir. Elektron yoğunluğu N_e 'nin maksimum elektron yoğunluğu ve h 'nın bir fonksiyonu olan Chapman Profili ile gösterilebileceği literatürde vurgulanmıştır. Chapman profiline en iyi uyum sağlayan h yüksekliği değerinin de 428,8 km'dir.

Faz ölçümleri ise daha az gürültülüdür ve hassas TEİ hesaplamaları için uygundur, fakat faz ölçümlerinde ilk faz belirsizliğine rastlanabilmektedir. Faz ölçümlerinden TEİ hesaplamak için önce ilk faz belirsizliğinin giderilmesi gerekmektedir. Bu ilk faz belirsizliği nedeniyle sadece faz ölçümlerinden TEİ hesaplamak kolay olmamaktadır. Faz ölçümlerinden TEİ hesaplamak için kullanılan yöntem aşağıda açıklanmıştır.

- Faz ile sözde menzil ölçümleri arasındaki farkın, faz kopmalarının olmadığı bir zaman dilimindeki ortalaması dayanak değerleri olarak isimlendirilir. Bu dayanak değeri bağıntısı Eş. 23'de verilmiştir.

$$B^m = \frac{1}{N_{me}} \sum_{n_{me}=1}^{N_{me}} (P_{4,u}^m(n_{me}) - L_{4,u}^m(n_{me})) \cong -\Delta N^m \quad (23)$$

B^m dayanak değerini, N_{me} faz datalarının sürekli olduğu zaman dilimini göstermektedir. Faz verileri bir gün boyunca sürekli değildir. Bu yüzden bir gün için birden fazla dayanak değeri hesaplanır. Hesaplanan bu dayanak değeri ile faz ölçümleri sözde menzil seviyelerine getirilir ve $STEC$ değeri Eş. 24'deki gibi hesaplanır. Bu yöntemle faz belirsizliği giderilmiş olur.

$$STEC_u^m(n) = \frac{1}{A} \left(\frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) (B^m + L_{4,u}^m(n) + c(DCB_u + DCB^m)) \quad (24)$$

$$VTEC_u^m(n) = STEC_u^m(n) / M(\epsilon_m(n)) \quad (25)$$

- Yukarıda anlatılan sözde menzilden yada sözde menzilin faz kaymaları ile uyumlandırılmasından elde edilen $VTEC$ değerleri herbir alıcı ve uydu için ayrı ayrı hesaplanır. Genelde uygulanan yerel zenite en yakın uyduyu seçip izlemek olmuştur. Bu yöntem ile tüm uydu bilgileri değerlendirilememekte ve uydu geçişlerinde kopmalar olmaktadır.
- IONOLAB grubu tarafından geliştirilen ve JAVA uygulaması IONOLAB-TEİ adı altında bu siteden kullanılabilen Düzgünleştirilmiş TEİ (D-TEİ) yöntemi ise gerek faz verilerinden elde edilen $VTEC$, gerek sözde menzil verileri kullanarak elde edilen $VTEC$ değerlerini girdi olarak alan ve 10° yükseklik açısı üzerindeki tüm uydu verileri Düzgünleştirilmiş En Küçük Kareler esasına dayanan özgün bir yöntem ile 30 s hassasiyette kestirebilmektedir.
- D-TEİ yöntemi ile yapılan TEİ kestirimi çalışmalarında Eş. 22'deki h değeri 428,8 km seçilmiştir. D-TEİ'nin kestirimleri iyonosfer yüksekliğinin seçimine gürbüz davranmış ve etkilenmemiştir.
- Yapılan çalışmalar D-TEİ yönteminden elde edilen TEİ kestirimlerinin iyonosferin orta enlem, yüksek enlem ve ekvatorial bölgelerinde yer alan çeşitli istasyonlar için sakin, pozitif ve negatif bozulmanın olduğu günler için son derece başarılı, yüksek zaman çözünürlüklü ve gürbüz olduğunu göstermiştir.

Bibliografya

1. AERO, Elements of GPS.
<http://www.aero.org/education/primers/gps/elements.html>
2. Anderson, D., Rowell, T. F., 1999, Space Environment Topics. The Ionosphere.
<http://www.sec.noaa.gov/info/Iono.pdf>
3. Araujo, E.A., 2005, GPS-derived total electron content response for the Bastille Day magnetic storm of 2000 at low mid-latitude station, *Geofisica Internacional*. 44, 211-218.
4. Arıkan, F., Erol, C.B., Arıkan, O., 2003, Regularized estimation of vertical total electron content from Global Positioning System data, *Journal of Geophysical Research*. 118, 1469-1480.
5. Arıkan, F., Erol, C.B., Arıkan, O., 2004, Regularized estimation of vertical total electron content from GPS data for a desired time period, *Radio Science*. 39, RS6012.
6. Arıkan, F., Arıkan, O. and Erol, C.B., Regularized estimation of TEC from GPS data for certain midlatitude stations and comparison with the IRI model, *Advances in Space Research*, doi:10.1016/j.asr.2007.01.082, 39, 867-874, 2007.
7. Arıkan, O., Arıkan, F., and Erol, C.B., Computerized ionospheric tomography with the IRI model, *Advances in Space Research*, doi:10.1016/j.asr.2007.02.078, 39, 859-866, 2007.
8. Bent, R. B., Llewellyn, S.K., Nesterczuk, G., 1975, The development of a highly-successful worldwide empirical ionospheric model and its use in certain aspects of space communications and worldwide total electron content investigations, *Proceedings of the Ionospheric Effects Symposium, Arlington, VA*, pp 13-28.
9. Bilitza, D., 2001, International Reference Ionosphere 2000, *Radio Science*, 36(2), 261-275.
10. Bishop, G., Mazzella, A., Holland, E., Rao, S., 1996, Algorithm that Use the Ionosphere to Control GPS Errors, *IEEE*, 0-7803-3085-4/96.
11. Blewitt, G., 1997, Basics of GPS Technuqie: Observation Equations, *Geodetic Applications of GPS*. <http://134.197.46.69/staff/pdfs/Blewitt>
12. Brunini, C., Meza, A., Francisco, A., Diaz, A., Zele, M.A.V., 2002, A New Ionosphere Monitoring Technology Based on GPS, *Eleventh United Nations/ European Space Agency Workshop on Basis Space Science, Cordoba, Arjantin*.
13. Calais, E., Minster, B.J., 1998, GPS, earthquakes the ionosphere, and the space shuttle, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 105, 167-181.
14. Conkright, R. O., 2004, Vertical Incidence Soundings (Ionograms).
<http://www.ngdc.noaa.gov/stp/IONO/ionogram.html>
15. Dana, P. H., 2000, Global Positioning System Overview.
http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps/gps_f.html

16. Eftaxiadis, K., Cervera, M. A., Thomas, R. M., 1999, A Global Positioning System Receiver for Monitoring Ionospheric Total Electron Content, DSTO Electronics and Surveillance Research Laboratory, AR-010-671.
17. Feltens, J., Chapman Profile for 3-D Global TEC Representation.
18. Feltens, J., Jakowski, N., 2002, International GPS Service (IGS) Ionosphere Working Activity, SCAR Report No:21.
19. GARMIN, 2000, GPS Guide For Beginners.
<http://www.garmin.com/manuals/GPSGuideforBeginners.Manual.pdf>
20. Goodman, J. M., 1992, HF Communications Science and Technology, Van Nostrand Reinhold, New York, 631s.
21. Goodwin, G. L., Breed, A. M., 2001, Total ELECTRON Content in Australia Corrected for Receiver/Satellite Offset Bias and Compared with IRI and PIM Predictions., Advanced Space Research, 27, 49-60.
22. Grejner-Brzezinska, A., Wielgosz, P., Kashani, I., Smith, D. A., Spencer, P. S. J., 2004, An analysis of the effects on different network-based ionosphere estimation models on rover positioning accuracy, Journal of Global Positioning Systems, 3, 115-131.
23. Jeomanyetik indisler,
http://www.ngdc.noaa.gov/stp/GEOMAG/kp_ap.html
24. GPS Measurements in RINEX format.
<http://igs.ensg.ign.fr>.
25. Halil Nayir, Yerküresel Konumlama Sistemi İşaretleri Kullanarak İyonosfer Toplam Elektron İçeriği Kestirimi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, 2007.
26. Hunsucker, R. D., Hargreaves J. K., 2003, The High-Latitude Ionosphere and Its Effects on radio Propagation, Cambridge University Press, Cambridge, 617s.
27. International GPS Service,
<http://igsb.jpl.nasa.gov/>.
28. IONEX TEC Maps,
<ftp://igs.ensg.ign.fr/pub/igs/iono>.
29. IRI TEC Maps,
<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/space/model/models/iri.html>.
30. Ionospheric Dispatch Center
http://www.cbk.waw.pl/rwc/q_d.days.ctl
31. Klobuchar, J.A, 1987, Ionospheric Time-Delay Algorithm for Single-Frequency GPS Users, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 25, 325-331.

32. Komjathy, A., Born, G. H., Anderson, D., N., 2000, An Improved High Precision Ionospheric Total Electron Content Modeling Using GPS, IEEE, 2858-2860.
33. Komjathy, A., Langley, R., 1996, An Assessment of Predicted and Measured Ionospheric Total Electron Content Using a Regional GPS Network, ION National Technical Meeting, Santa Monica, CA.
34. Komjathy A., 1997, Global Ionospheric Total Electron Content Mapping Using the Global Positioning System, PhD Thesis, University of New Brunswick , Canada, 248s.
35. Lanyi, G.E., Roth, T., 1988, A comparison of mapped and measured total ionospheric electron content using global positioning system and beacon satellite observations, Radio Science. 23, 483-492.
36. Liao, X., 2000, Carrier Phase Based Ionosphere Recovery Over A Regional Area GPS Network, MSc Thesis, University of Calgary, Canada, 120s.
37. Lin, L.S., 2001, Remote Sensing of Ionosphere Using GPS Measurements, Asian Conference on Remote Sensing, Singapore.
38. Makalea, J.J., Kelley, M. C., Sojka, J. J., Pi, X., Manucci, A. J., 2001, GPS normalization and preliminary modeling results of total electron content during midlatitude space weather event, Radio Science, 36, 356-361.
39. Manucci, A.J., Wilson, B. D., Yuan, D. N., Ho, C. H., Lindqwister, U. J., Runge, T. F., 1998, A global mapping technique for GPS-derived ionospheric total electron content measurements., Radio Science, 33, 565-582.
40. Ma, G., Maruyama, T., 2003, Derivation of TEC and estimation of instrumental biases from GEONET in Japan, Annales Geophysicae, 21, 2083-2093.
41. Melike Gürün, Sinir Ağı Modelleme Yntemleri Kullanarak TEİ Verileri ile Durağan ve Dinamik Bölgesel İyonosfer Haritasının Oluşturulması, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, 2007.
42. Montenbruck, O., Gill, E., 2002, Ionospheric Correction for GPS Tracking of Leo Satellites, The Journal of Navigation, 55, 293-304.
43. Moon, Y., 2004, Evaluation of 2-Dimensional Ionosphere Models for National And Regional GPS Networks in Canada, MSc Thesis, University of Calgary, Canada.
44. National Geophysical Data Center, <http://www.ngdc.noaa.gov/>.
45. National Oceanic and Atmospheric Administration, <http://www.noaa.gov/>
46. Orhan Uğurlu, Ionolab Yöntemi ile WEB Tabanlı Toplam Elektron İçeriği (TEİ) Hesaplanması ve Sunumu, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, 2007.
47. Otsuka, Y., Ogawa, T., Saito, A., Tsugawa, T., Fukao, S., Miyazaki, S., 2002, A new technique for mapping of total electron content using GPS network in Japan, Earth Planets Space, 54, 63-70.

48. Rizos, C., 1999, GPS tutorial.
http://www.gmat.unsw.edu.au/snap/gps/gps_survey/tutorials.
49. Schaer, S., 1999, Mapping and Predicting the Earth's Ionosphere Using the Global Positioning System, PhD Thesis, University of Bern, Switzerland, 228p.
50. The ionosphere. www.radioelectronics.com.
51. Why Conduct Ionospheric Research?
<http://www.harp.alaska.edu/harp/ion2.html>
52. Wyllie, S.J., Zhang, K.F., 2003, A Comparison of Ionospheric Models for Precise Positioning in Victoria, Satnav2003.